

# IEEE 802.11p를 위한 향상된 가상 기준 신호 기반 MMSE 채널 추정 기법

최주영\*, 문철°, 육종관\*

## MMSE Channel Estimation Scheme Using Improved Virtual Pilot Signal for IEEE 802.11p

Joo-Young Choi\*, Cheol Mum°, Jong-Gwan Yook\*

### 요약

본 레터는 IEEE 802.11p의 성능을 향상시키기 위해 기존의 가상 기준신호(virtual pilot)를 이용하는 MMSE(minimum mean square error) 기법에서, 가상 기준신호의 정확도를 높여 오류 성능을 향상시키는 새로운 채널 추정 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법이 기존 MMSE 대비 PER(packet error rate)에서 최대 10dB의 성능 이득이 발생함을 보인다.

**Key Words** : IEEE 802.11p, WAVE, channel estimation, OFDM, vehicular environments

### ABSTRACT

In this letter, we propose a novel channel estimation scheme, which further improves the previous MMSE channel estimation scheme using virtual pilot signals for IEEE 802.11p, by increasing the accuracy of a virtual pilot. Simulation results

show that the proposed scheme provides a performance gain up to 10dB in terms of PER over the previous MMSE scheme.

### I. 서론

차량용 무선 통신 시스템인 WAVE(wireless access in vehicular environment)는 V2X(vehicle-to-everything) 통신을 위해 개발되었다. IEEE 802.11p는 WAVE에서 물리계층과 매체 접속 제어 계층을 정의하며, 한 심볼 주기 동안 4개의 기준신호 부반송파(pilot subcarrier)를 사용한다<sup>[1]</sup>.

도심 실외 환경에서 무선 채널은 지연확산(delay spread)에 의한 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)을 겪으며, IEEE 802.11p 표준에 정의된 4개의 기준신호 부반송파만으로는 주파수 영역에서의 채널 변화를 정확하게 예측하기 어렵다. 이는 통신 시스템의 성능 열화로 이어진다.

이를 해결하기 위하여 본 연구진은 가상 기준신호(virtual pilot)를 이용하는 MMSE(minimum mean square error) 기법<sup>[2]</sup>을 제안하고 기존의 다른 채널 추정 기법에 비해 성능 이득이 있음을 보였다. 그러나, MMSE 채널 추정에 사용되는 가상 기준신호의 초기 채널 추정치에 디매핑(demapping) 오류가 포함되어 있으며, 이로 인해 MMSE 채널 추정 성능이 열화됨을 파악하였다.

본 레터에서는 기존의 MMSE에서 사용되는 가상 기준신호의 초기 채널 추정치에 대한 정확도를 향상시켜 MMSE 채널 추정 성능을 개선한 새로운 채널 추정 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법이 기존 MMSE에 비해 높은 오류 성능을 보일 수 있음을 증명한다.

### II. 제안하는 기법

IEEE 802.11p는 OFDM(orthogonal frequency-division multiplexing)을 기반으로 하며, 표 1은 IEEE

\* 본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원 (19CTAP-C151968-01), 2019년도 정부(경찰청)의 재원으로 도로교통공단의 지원(No.POLICE-L-00001-01-101), 그리고 2019년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

• First Author : (ORCID:0000-0002-5582-3317)Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, cjoy0103@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-2358-8375)Department of Electronic Engineering, Korea National University of Transportation, chmun@ut.ac.kr, 정회원

\* (ORCID:0000-0001-6711-289X)Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, jgyook@yonsei.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201909-206-A-LU, Received September 25, 2019; Revised October 6, 2019; Accepted October 7, 2019

표 1. IEEE 802.11p의 OFDM 시스템 파라미터  
Table 1. OFDM System Parameters in IEEE 802.11p

Parameter	Value
Carrier frequency	5.9 GHz
Bandwidth	10 MHz
The number of data subcarriers	48
The number of pilot subcarriers	4
The number of total subcarriers	64
The length of cyclic prefix	16
Sample time	0.1 $\mu$ s
Symbol duration	8.0 $\mu$ s

802.11p의 시스템 파라미터를 나타낸다. 표 1과 같이 IEEE 802.11p 기반의 송·수신 환경이 고려되었으며, 이동 채널 모델은 실제 측정 데이터에 기반하여 예측한 TD-L(tapped delay line) 채널 모델<sup>13)</sup>을 사용하였다.

기존의 MMSE는 주파수 영역 수신 심볼에서 임의의 가상 기준신호 부반송파를 지정하고 이를 사용하여 채널 추정의 정확도를 향상시킨다. 가상 기준신호는 미리 지정된 데이터 부반송파를 의미하며, 데이터 및 기준신호 부반송파와의 상관성을 유지하기 위해 균일하게 할당된다. MMSE 기법은 가상 기준신호의 초기 채널 추정치를 사용하여 채널 공분산 행렬(covariance matrix)을 획득하고 이를 사용하여 주파수 영역에서 채널 추정을 수행한다. 그러나, 가상 기준신호의 초기 채널 추정치는 잡음과 디매핑 오류를 포함하고 있으므로 이를 활용하여 얻은 MMSE의 최종 채널 추정치는 정확성이 감소하는 문제점이 발생한다.

따라서, 기존의 MMSE 기법이 가지는 문제점을 보완하기 위해, 가상 기준신호의 초기 채널 추정치가 포함하고 있는 디매핑 오류를 줄일 수 있는 효과적인 time-domain truncation 기법<sup>14)</sup>을 통해 가상 기준신호의 정확도를 향상시키고, 이를 통해 채널 추정 성능을 향상시키는 기법을 제안한다.

먼저, 수신기에서 시간 및 주파수 동기화가 완벽하다고 가정하면, CP(cyclic prefix)를 제거하고 FFT(fast Fourier transform)를 수행 한 후  $m$ 번째 심볼의  $k$ 번째 데이터 부반송파에서 수신된 신호는 다음과 같이 나타낸다.

$$R(m, k) = H_p(m, k)X(m, k) + Z(m, k) \quad (1)$$

여기서  $H_p(m, k)$ 와  $X(m, k)$ 는 각각 완벽한 채널 응답

(channel response) 및 송신 심볼이고,  $Z(m, k)$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma_z^2$ 인 가산 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise)이다.

다음으로, 수신 신호  $R(m, k)$ 를 직전 수신 신호  $R(m-1, k)$ 의 채널 추정치  $H(m-1, k)$ 를 이용하여 등화한다.

$$\hat{T}(m, k) = \frac{R(m, k)}{H(m-1, k)}, m = 1, \dots, M. \quad (2)$$

$m=1$ 일 때,  $H(0, k)$ 는 패킷 초기에 수신된 두 신호  $R_0(1, k)$  및  $R_0(2, k)$ 를 송·수신기가 알고 있는 긴 트레이닝 심볼  $X_0(k)$ 로 나누어줌으로써 얻어진 평균 채널 추정치로 정의된다, 즉,  $H(0, k) = (R_0(1, k) + R_0(2, k)) / 2X_0(k)$ 이다.  $M$ 은 한 패킷을 구성하고 있는 총 OFDM 심볼의 수이다.

이어서,  $T(m, k)$ 에 대한 디매핑 과정을 수행한 후 변조 심볼  $X(m, k)$ 를 추정하고 초기 채널 추정치를 다음과 같이 구한다.

$$\hat{H}(m, k) = \frac{R(m, k)}{\hat{X}(m, k)}. \quad (3)$$

그 다음, 집합  $S_p$ 와  $S_{vp}$ 에 포함된 부반송파의 채널 추정치를 이용하여 기준 신호 채널 추정 벡터  $\mathbf{P}_m$ 을 정의한다.

$$\hat{\mathbf{P}}_m = [\hat{H}(m, -21), \hat{H}(m, -7), \hat{H}(m, k), \dots, \hat{H}(m, 21)]^T, \quad k \in S_p, S_{vp} \quad (4)$$

여기서  $S_p$ 와  $S_{vp}$ 는 각각 기준신호와 가상 기준신호 부반송파의 집합을 의미한다. 한 OFDM 심볼에서의 가상 기준신호 부반송파의 수는 최대 48개로 지정할 수 있으며, 제안하는 기법은 가상 기준신호 부반송파의 수가 최대인 경우를 기준으로 한다.

식 (3)에서  $\mathbf{P}_m$ 을 구성하는 초기 채널 추정치는 디매핑 오류와 잡음 성분을 포함하고 있다. 따라서, 이러한 성분으로 인해  $\mathbf{P}_m$ 의 정확도는 매우 낮아진다. 이를 해결하기 위하여 초기 채널 추정의 정확도를 개선하는데 뛰어난 time-domain truncation 기법<sup>14)</sup>을  $\mathbf{P}_m$ 에 적용한다.

Time-domain truncation을 적용하기 위해서, 주파수 영역 채널 벡터  $\mathbf{P}_m$ 은 다음과 같이 시간 영역 채널 벡터로 변환한다.

$$\hat{\mathbf{p}}_m = \frac{1}{K} \mathbf{W}^H \hat{\mathbf{P}}_m, \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{W}$ 는  $K \times K$  크기의 FFT 행렬의 열을  $L$ 로 변환한 행렬, 즉  $K \times L$  행렬이다.  $\mathbf{W}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{W} = \sqrt{K} \mathbf{F}_K(:, 1:L), \quad (6)$$

여기서  $L$ 은 채널 탭 수를 나타내며 V2X 채널 모델<sup>[3]</sup>을 고려하여 8로 설정한다.

기준신호의 시간 영역 채널 추정 벡터  $\mathbf{p}_m$ 은  $L$ 번째 탭 이후의 잡음 성분을 제거하고 다음과 같이 표시된다.

$$\hat{p}(m, n) = \begin{cases} h(m, n) + z(m, n), & n = 1, 2, 3, \dots, L \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 시간 샘플을 의미하며,  $h(m, k)$  및  $z(m, k)$ 는 각각 시간 영역의 채널 및 잡음 성분을 나타낸다.

주파수 영역에서의 가상 기준신호의 초기 채널 추정 벡터는 time-domain truncation을 통해 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{W} \hat{\mathbf{p}}_m(1:L). \quad (8)$$

마지막으로 정확도가 향상된 기준신호 채널 추정 벡터  $\mathbf{P}_m$ 은 다음 수식에 의해 MMSE에 의한 최종 채널 추정치를 구한다<sup>[3]</sup>.

$$\mathbf{H}_{MMSE}^m = \mathbf{R}_{HP}^m (\mathbf{R}_{PP}^m + \sigma_m^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{P}_m \quad (9)$$

여기서  $\mathbf{R}_{HP}^m$ 은 초기 채널 추정 벡터  $\mathbf{H}_m$ 과 향상된 기준신호 채널 추정 벡터  $\mathbf{P}_m$ 의 상호 상관 행렬이고,  $\mathbf{R}_{PP}^m$ 은 향상된 기준신호 채널 추정 벡터의 자기 상관 행렬이다.  $\mathbf{I}$ 는  $52 \times 52$  크기의 단위 행렬이며,  $\sigma_m^2$ 은 잡음 전력을 나타낸다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 복잡도 분석

본 장에서는 제안하는 time-domain truncation에 의해 정확도가 향상된 가상 기준신호를 사용하는 MMSE 채널 추정 기법의 PER(packet error rate) 성능을 기존 MMSE 기법<sup>[2]</sup> 및 time-domain truncation

기법<sup>[4]</sup>과 비교한다.

기존의 MMSE 기법은 가상 기준신호를 사용하여 여러 성능을 개선하며 time-domain truncation 기법은 시간 영역에서의  $L$ 번째 탭 이후의 잡음 성분을 제거함으로써 성능을 향상시킨다. 반면에, 제안하는 기법은 기존의 MMSE 기법에서 사용되는 가상 기준신호의 정확도를 time-domain truncation 기법을 이용하여 상승시켜 성능 이득을 얻는다.

채널 환경은 [3]에 제시된 채널 모델 중 V2V Expressway Oncoming과 V2I Urban Canyon 모델에 대해서 시뮬레이션이 수행되었다. 변조 방식은 QPSK, code=1/2일 때를 가정하며, 패킷은 50개의 OFDM 심볼로 구성하였다.

그림 1은 V2I 채널에서의 PER 성능 그래프이다. 낮은 SNR(signal-to-noise ratio)에서 time-domain

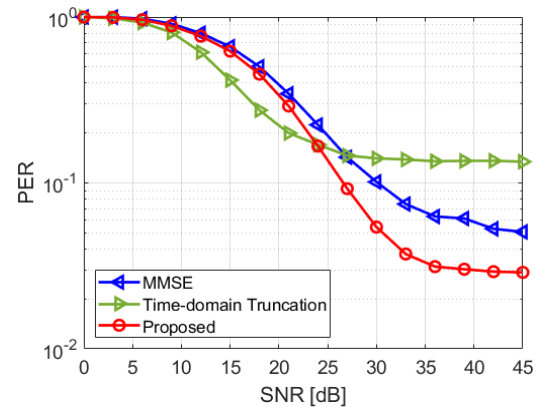


그림 1. PER 성능 (V2I 채널, QPSK 1/2, 50 심볼)  
Fig. 1. PER performance (V2I channel, QPSK 1/2, 50 symbols).

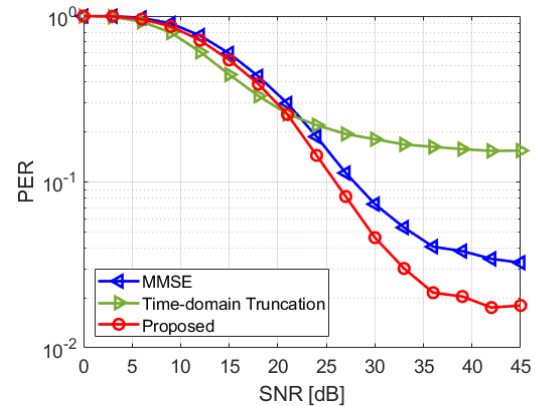


그림 2. PER 성능 (V2V 채널, QPSK 1/2, 50 심볼)  
Fig. 2. PER performance (V2V channel, QPSK 1/2, 50 symbols).

표 2. 시간 복잡도 비교  
Table 2. Comparison of Time Complexity

Scheme	Total Complexity
Time-domain truncation	$O(N)$
MMSE	$O(N^2)$
Proposed	$O(N^2)$

truncation 기법은 우수한 성능을 제공하지만, SNR이 증가하더라도  $10^{-1}$ 의 PER에 도달하지 못하며 에러 플로어 현상이 발생한다. 반면에 제안하는 기법은 낮은 SNR에서는 time-domain truncation 기법보다 감소된 성능을 보이지만 높은 SNR에서는 우수한 성능을 제공한다. 또한 기존의 MMSE 기법보다 전체 SNR 구간에서 성능 이득이 발생하며  $5 \times 10^{-2}$ 의 PER에서 10dB의 이득이 발생한다.

그림 2는 V2V 채널에서의 PER 성능 그래프를 나타내며, 그림 1과 비슷한 경향성을 보여준다. 높은 SNR에서, 제안하는 기법은 다른 두 기법 대비 우수한 성능을 보여주며, MMSE 기법보다  $3 \times 10^{-2}$ 의 PER에서 7dB의 성능 이득을 제공한다.

표 2는 제안하는 기법과 비교 기법들의 시간 복잡도를 나타낸다. 복잡도 분석은 알고리즘의 효율성을 계산하는데 사용되는 빅오 표기법(Big-O notation)<sup>[5]</sup>을 이용하여 수행되었다.

제안하는 기법은 패킷에서 심볼 단위로 순차적으로 수행되기 때문에, 하나의 OFDM 심볼에 대한 복잡도 분석은 전체 패킷의 복잡도를 계산하기 위해 선형적으로 확장될 수 있다. 하나의 OFDM에서 추정될 부반송파의 총 개수가  $N$ 이라고 가정하면, 시간 복잡도는 표 2와 같이 단순화할 수 있다.

Time-domain truncation 기법은 크기가  $N \times L$ 인 FFT 행렬과 초기 채널 추정 벡터와의 곱연산을 통해서 최종 채널 추정치를 얻으므로,  $O(N)$ 의 복잡도를 갖는다. 반면에, MMSE 및 제안하는 기법은 최종 채널 추정치를 구하기 위해서 크기가  $N \times N$ 인 상관행렬과 기준신호 채널 추정 벡터의 곱연산을 수행하므로  $O(N^2)$ 의 복잡도를 갖는다.

#### IV. 결 론

본 레터에서는 기존의 MMSE 기법에서 사용되는 가상 기준 신호의 정확도를 높여 오류 성능을 개선시키는 새로운 채널 추정 기법을 제안하였다.

기존 연구를 통해 개발되었던 MMSE 기법은 사용되는 가상 기준신호의 초기 채널 추정치에 포함된 디

매핑 오류로 인하여 정확도가 감소하며, 이로 인해 채널 추정 성능의 열화가 발생한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 파악하여 가상 기준신호의 초기 채널 추정치에 time-domain truncation 기법을 적용함으로써 채널 추정치의 정확도를 상승시켜 전체적인 오류 성능을 향상시켰다.

제안하는 채널 추정 기법은 V2I 및 V2V 채널 환경에서 타 기법들보다 높은 SNR에서 우수한 성능을 제공하였으며, QPSK 변조 방식의 PER 성능에서 기존의 MMSE 채널 추정 기법보다 최대 10dB 이득을 얻는 것을 확인하였다.

#### References

- [1] *IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*, IEEE Std 802.11p-2010, Jul. 2010.
- [2] J.-Y. Choi, K. H. Yoo, and C. Mun, “MMSE channel estimation scheme using virtual pilot signal for IEEE 802.11p,” *J. Korean Inst. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 6, pp 51-57, Jun. 2016.
- [3] G. Acosta-Marum and M. A. Ingram, “Six time-and frequency-selective empirical channel models for vehicular wireless LANs,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 4-11, Dec. 2007.
- [4] M. M. Awad, K. G. Seddik, and A. Elezabi, “Low-complexity semi-blind channel estimation algorithms for vehicular communications using the IEEE 802.11p standard,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 5, pp. 1739-1748, May 2018.
- [5] T. H. Cormen, C. Stein, R. L. Rivest, and C. E. Leiserson, *Introduction to Algorithms*, 3rd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2009.